



Roland Bücke,
**Die Messung von Radialgeschwindigkeiten mit
einem Spaltspektrographen niedriger Auflösung**

Artikel erschienen im
Journal für Astronomie Nr. 19,
Vereinszeitschrift der [Vereinigung der Sternfreunde e.V. \(VdS\)](#).

Bereitgestellt durch die [VdS-Fachgruppe Spektroskopie](#).

Referenz:
R. Bücke, VdS-Journal Nr. 19 (2006) 94ff

Die Messung von Radialgeschwindigkeiten mit einem Spaltspektrographen niedriger Auflösung

von Roland Bücke

Für die Messung von Radialgeschwindigkeiten sind vor allem Spaltspektrographen geeignet, da Nachführfehler bei Langzeitbelichtungen nicht zur „Verschmierung“ der Spektren führen und Spektren von geeigneten künstlichen Lichtquellen, wie Glimmlampen, direkt zur Wellenlängenkalibration herangezogen werden können.

In diesem Beitrag möchte ich erste Ergebnisse meiner Untersuchungen zur Genauigkeit von Radialgeschwindigkeitsmessungen vorstellen, die ich an meinem Gitterspektrographen mit Lichtleiterankopplung durchgeführt habe.

Technische Ausstattung

Mein für die Untersuchung genutztes Instrumentarium ist in [1] beschrieben. Es besteht aus einem Newtonteleskop in Dobsonbauweise mit 20 cm Öffnung und 165 cm Brennweite. Das Reflexionsgitter des Spektrographen hat 1.800 Linien/mm und 55 mm Kantenlänge. Die Kollimatorbrennweite beträgt 200 mm, die Kamerabrennweite ist 135 mm. Der Eintrittsspalt des Spektrographen wird durch die Austrittsfläche des Lichtleiters gebildet und ist daher im Gegensatz zum „normalen“ Spalt kreisförmig. Mit einem Durchmesser des Lichtleiters von 200 μm ergibt sich eine spektrale Auflösung von 1,9 \AA . Die CCD-Zeilenkamera mit 2.048 Pixeln ($14 \times 200 \mu\text{m}^2$) als Detektor ist mit einem 12-Bit AD-Wandler und Peltierkühlung ausgestattet. Als Vergleichslichtquelle nutze ich eine Neon-Glimmlampe.

Auswahl der Beobachtungsobjekte

Die Grundlage für die Auswahl bildete das Verzeichnis von Fundamentalsternen für Radialgeschwindigkeitsmessungen der IAU [2], da hierdurch gewährleistet ist, dass die Spektren keinen zeitlichen Variationen unterliegen. Folgende Kriterien schränkten die Zahl der geeigneten Kandidaten weiter ein:

- ausreichende Helligkeit des Sterns für ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von möglichst $S/N > 100$ bei Belichtungszeiten bis maximal 3 Minuten (Grenzgröße ca. 2 mag)
- genügende Anzahl auswertbarer Absorptionslinien im Spektralbereich von 5.800 bis 6.800 \AA (Bereich mit vielen Vergleichslinien des Neon-Spektrums)
- das Beobachtungsfenster meines Standortes

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien wählte ich deshalb für die ersten Versuche die Sterne α Tauri (Aldebaran) und α Persei (Mirphak) aus. Aldebaran ist ein Stern des Spektraltyps K5 mit einer visuellen Größe von 0,85 mag. Die mittlere Radialgeschwindigkeit beträgt +54,4 km/s

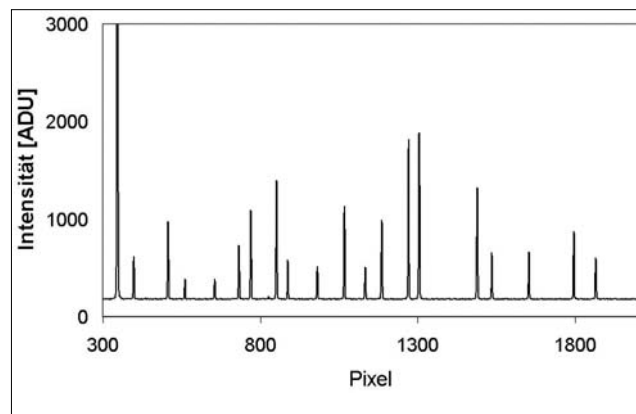


Abb. 1: Neonspektrum im Bereich 5800 – 6800 \AA

[2]. Mirphak gehört dem Spektraltyp F5 an und hat eine Radialgeschwindigkeit von -2,5 km/s [2]. Seine Helligkeit beträgt 1,8 mag.

Reduktion der Radialgeschwindigkeiten auf die Sonne

Die Linienverschiebung $\Delta\lambda$ gegenüber der Ruhewellenlänge λ_0 hervorgerufen durch die Relativbewegung des Sterns stellt die Radialgeschwindigkeit V_{dop} des Sterns in Bezug auf den Beobachter dar. Sie beruht auf dem Dopplereffekt, s. Gleichung (1). Die Radialgeschwindigkeit wird positiv gezählt, wenn sich der Stern vom Beobachter wegbewegt und negativ, wenn er sich ihm nähert.

Durch die Eigenbewegung des Beobachters gemeinsam mit der Erde (Revolution und Rotation) ist die Linienverschiebung

| Spektrallinie | \AA | Radialgeschwindigkeit / km/s | | | Mirphak | |
|---------------|--------------|------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| | | Aldebaran | | | 1. Messung | 2. Messung |
| | | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung | | |
| Na I | 5889,973 | 55,5 | 53,0 | 50,8 | -3,7 | -1,2 |
| Na I | 5895,940 | 55,1 | 52,8 | 51,9 | 0,0 | 1,1 |
| Ca I | 6102,727 | 60,8 | 58,8 | 57,3 | -6,4 | -4,9 |
| Ca I | 6122,226 | / | / | / | -4,0 | 2,6 |
| Ca I | 6162,180 | 56,1 | 53,2 | 49,9 | -8,2 | -7,5 |
| H α | 6562,808 | 62,0 | 59,4 | 57,6 | -3,2 | -3,5 |
| He I | 6678,154 | 57,5 | 56,3 | 52,4 | / | / |
| Mittelwert: | 57,8 | 55,6 | 53,3 | -4,3 | -2,2 | |

Tab. 1: Einzelmesswerte der Radialgeschwindigkeiten von Aldebaran und Mirphak

| | |
|---|---|
| $\Delta\lambda = \lambda_0 \cdot V_{dop} / c$ | (1) |
| $V_E = v \cos b \sin(l_s - l) + v \cdot e \cos b \sin(\Gamma - l)$ | (2) |
| $V_E = A((\cos \alpha \cos \delta) \Delta x + (\sin \alpha \cos \delta) \Delta y + \sin \delta \Delta z)$ | (3) |
| $V_{rot} = V_A \sin h \cos \delta \cos \phi$ | (4) |
| $V_{rad} = V_{dop} + V_E + V_{rot}$ | (5) |
| A | Umrechnungsfaktor, der den Übergang auf km/s bewirkt (A = 1731) |
| Γ | ekliptikale Länge der Sonne im Perigäum |
| b | ekliptikale Breite des Sterns |
| c | Lichtgeschwindigkeit |
| e | Exzentrizität der Erdbahn |
| h | Stundenwinkel des Sterns |
| l | ekliptikale Länge des Sterns |
| l_s | ekliptikale Länge der Sonne |
| V_A | Rotationsgeschwindigkeit der Erde am Äquator |
| V_E | Radialgeschwindigkeitskomponente der Erdbewegung um die Sonne |
| V_{dop} | Dopplergeschwindigkeit |
| V_{rot} | Radialgeschwindigkeit, bezogen auf die Sonne |
| V_{rot} | Radialgeschwindigkeitskomponente der Erdrotation |
| $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ | tägliche Veränderung der rechtwinkligen, äquatorialen Koordinaten der Sonne |
| α | Rektaszension des Sterns |
| δ | Deklination des Sterns |
| λ_0 | Laborwellenlänge |
| $\Delta\lambda$ | Wellenlängendifferenz |
| v | mittlere Umlaufgeschwindigkeit der Erde um die Sonne |

nicht konstant. Aus diesem Grund wird die Radialgeschwindigkeit auf die Sonne bezogen, indem diese um die Geschwindigkeitskomponente des erdgebundenen Beobachters zum Zeitpunkt der Spektralaufnahme korrigiert wird.

Die Berechnung der Radialgeschwindigkeitskomponente infolge der Bewegung der Erde um die Sonne V_E kann entweder mit den elliptischen Bahnelementen der Erde oder auf der Basis rechtwinkliger Koordinaten der Sonne erfolgen [1, 2], vgl. (2) und (3). Die Korrektur der Rotationsgeschwindigkeit der Erde erfolgt nach Gleichung (4). Es gilt $V_{rot} < 0$, falls der Stern westlich des Meridians steht. Weitere kinematische Effekte sind so klein, dass sie bei der Korrektur nicht berücksichtigt werden müssen. Die auf die Sonne bezogene Radialgeschwindigkeit ist dann (5).

Wellenlängenkalkulation

Zur Wellenlängenkalkulation benutzte ich eine Neonglimmlampe, die ein ausgeprägtes Emissionslinienspektrum im Wellenlängenbereich von 5800–6800 Å zeigt,

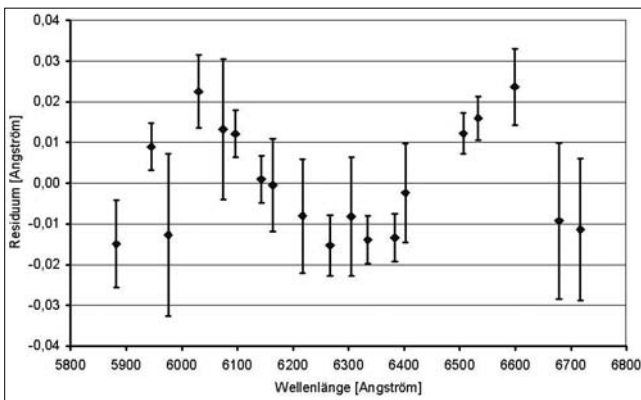


Abb. 2: Residuen der Neonlinien bei der Regression mit einem Polynom 3. Ordnung und deren Standardabweichung ermittelt aus 6 Einzelmessungen

siehe Abbildung 1. Die genauen Wellenlängen findet man in der einschlägigen Literatur [4] oder im Internet [5]. Die Linienschwerpunkte wurden ermittelt, indem an jede Linie eine Gauß-Funktion angepasst wurde. Aus den so gewonnenen Datenpunkten kann eine Polynom-

funktion errechnet werden, mit der dann die eigentliche Kalibrierung des Sternspektrums erfolgt. Die Abbildungen 2 und 3 belegen, dass die Regression mit einem Polynom 4. Ordnung eine leichte Verbesserung gegenüber einem Polynom 3. Ordnung bringt. Es sei darauf hingewiesen, dass eine Extrapolation über die Linien der kürzesten und längsten Wellenlänge hinaus schnell zu sehr großen Fehlern führt. Es können also nur Sternlinien innerhalb des Bereichs der Vergleichslinien sinnvoll ausgewertet werden.

Stabilität des Spektrographen

Einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit von Radialgeschwindigkeitsmessungen hat die Stabilität des Spektrographen. Insbesondere bewirken mechanische Verbiegungen und thermische Einflüsse Linienverschiebungen zwischen Stern- und Vergleichsspektrum; aber auch die Luftfeuchtigkeit kann bei der Verwendung ungeeigneter Materialien zur Instabilität beitragen. Obwohl mein Spektrograph eine hohe

Steifigkeit besitzt, da er vollständig aus Metall aufgebaut ist, bleibt natürlich seine Temperaturabhängigkeit bestehen. Deren Kenntnis ist für eine optimale Versuchsplanung wichtig, besonders hinsichtlich der zeitlichen Abfolge bei der Aufnahme von Stern- und Vergleichsspektren, Dunkelstrom- und Flatfieldbildern.

In Abbildung 4 ist die zeitliche Positionsänderung einiger ausgewählter Neonlinien bezogen auf den Zeitpunkt des Einschaltens der Kamerakühlung dargestellt. Es ist erkennbar, dass das thermische Gleichgewicht nach ca. 40 Minuten erreicht wird und die eigentlichen Aufnahmen somit erst nach dieser Einlaufzeit beginnen können. Voraussetzung dafür ist, dass der Spektrograph nach dem Transport ins freie Gelände lange genug an die Umgebungstemperatur angepasst wurde. Die unterschiedlich große Verschiebung der CCD-Pixel gegenüber dem feststehenden Neonspektrum erklärt sich durch das Schrumpfen des Chips infolge der Abkühlung. Die Berechnung ergab einen Längenausdehnungskoeffizient von ca. $3 \times 10^{-6} / K$, der sehr gut dem Wert von Silizium entspricht. Die Linienverschiebungen sind kleiner als eine Pixelbreite.

Bei einer Dispersion von 0,57 Å/Pixel entspricht eine Dopplerverschiebung der H α -Linie um beispielsweise eine Pixelbreite einer Geschwindigkeitsdifferenz von immerhin 26 km/s! Dies verdeutlicht die hohen Stabilitätsanforderungen an den Spektrographen. Da aber „nur“ die Positionen der Linienzentren für Radialgeschwindigkeitsmessungen ermittelt werden müssen, sind noch Linienverschiebungen detektierbar, die weit kleiner als das spektrale Auflösungsvermögen des

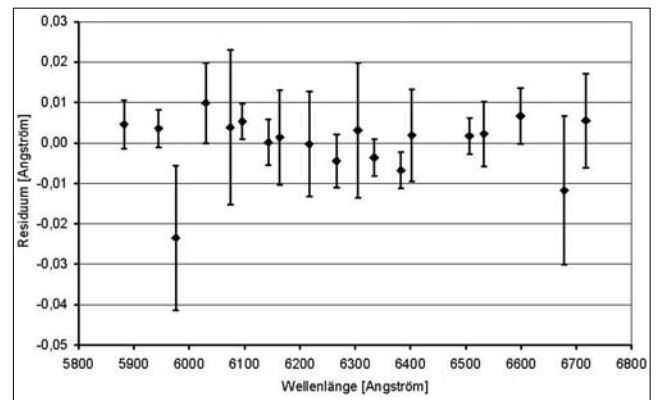


Abb. 3: Residuen der Neonlinien bei der Regression mit einem Polynom 4. Ordnung und deren Standardabweichung ermittelt aus 6 Einzelmessungen

Spektrographen sind!

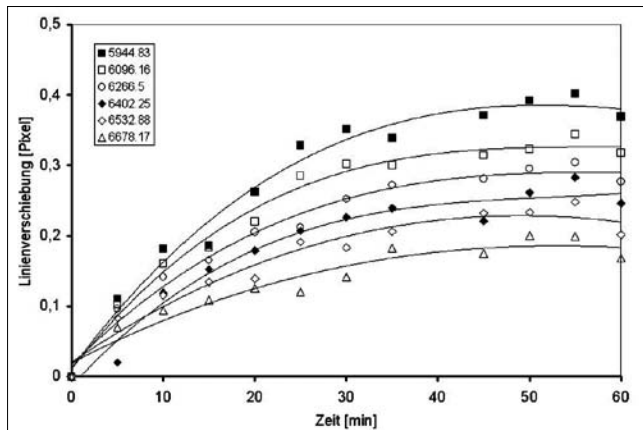
Messverfahren und Methodik der Auswertung

Unmittelbar vor und nach der Aufnahme eines Sternspektrums wird jeweils ein Vergleichsspektrum zur Wellenlängenkalibrierung aufgenommen. Verschiebungen des Spektrums während der Aufnahmezeit können so erkannt und bedingt korrigiert werden. Nach der Reduktion des Rohspektrums durch Dunkelstromabzug, Flatfield-Korrektur sowie Normierung erfolgt die Wellenlängenkalibrierung mittels eines Polynoms 4. Ordnung (siehe oben).

Im nächsten Schritt werden im Spektrum möglichst viele genügend stark ausgeprägte Linien identifiziert. Von diesen wird dann wiederum durch eine Gaußanpassung die Wellenlänge des Linienzentrums bestimmt. Um die Dopplerverschiebung einer stellaren Linie errechnen zu können, muss man die genaue unverschobene Ruhewellenlänge kennen. Dies ist i. a. problematisch, da fast jede Linie noch eng benachbarte, schwächere Linien enthält und einen so genannten Blend bildet. Da die Intensität der Nebenlinien auch noch stark von der Temperatur des Sterns abhängt, kann die stellare Linie sowohl von der Laborwellenlänge abweichen als auch zwischen verschiedenen Spektraltypen variieren [6]. Die Beispiele der Anpassung an die Linien des Na I und Ca I in der Abbildung 5 lassen erkennen, dass Störungen der Liniengeometrie die Wellenlängenbestimmung stark beeinflussen.

Bei spektroskopischen Doppelsternen betreffen diese Probleme nur die Radialgeschwindigkeit des Systemschwerpunktes. Für die Bestimmung der Bahnelemente sind sie von untergeord-

Abb. 4:
Positionenänderung
einiger ausgewählter Ne-
kalibrierlinien in
Abhängigkeit von
der Kühlzeit der
Kamera



netter Bedeutung.

Die Genauigkeit einer Radialgeschwindigkeitsmessung verbessert sich mit der Anzahl der untersuchten Linien in einem Spektrum und mit einer zunehmenden Zahl von Wiederholungsmessungen, da sich die zufälligen Fehler herausmitteln.

Ergebnisse der Radialgeschwindigkeitsmessungen

Derzeit liegen drei von mir aufgenommene Spektren von Aldebaran und zwei Spektren von Mirphak vor. Damit ist die Datenbasis für eine genauere statistische Analyse noch zu gering. Aus den Messwerten in Tabelle 1 ergeben sich für die zwei Objekte folgende Radialgeschwindigkeiten:

Aldebaran: $(+55,6 \pm 1,6)$ km/s,

Literaturvergleich [1]: $+54,4$ km/s

Mirphak: $(-3,3 \pm 0,9)$ km/s,

Literaturvergleich [1]: $-2,5$ km/s

Die Standardabweichung des Mittelwertes gibt Auskunft über die Streuung der voneinander unabhängigen Einzelmessungen. Rückschlüsse auf die Genauigkeit der ermittelten absoluten Radialgeschwindigkeiten sollten trotz der erstaunlich guten Übereinstimmung mit den Literaturwerten daraus nicht gezogen werden, da hierfür eine

Analyse der systematischen Fehler bei der Vermessung der stellaren Linien erforderlich wäre. Jedoch lässt sich vermuten, dass deren Einfluss nicht dominant ist.

Es bleibt noch zu untersuchen, welche Auswirkung das S/N auf die Radialgeschwindigkeitsmessung hat. Des Weiteren ist die Anwendung der Kreuzkorrelation als alternative Auswertungsmethode insbesondere bei der Beobachtung von spektroskopischen Doppelsternen von Interesse, da hier fast identische Spektren miteinander verglichen werden können.

Literaturhinweise

- [1] R. Bücke, 2005: „Spektroskopie mit Dobson-Teleskopen“, *VdS-Journal für Astronomie* Nr. 16 (I/2005), 81
- [2] G. Eberhard (Hrsg.), 1933: „Handbuch der Astrophysik, Bd. I: Grundlagen der Astrophysik, Teil 1“, Springer-Verlag
- [3] G. D. Roth (Hrsg.), 1989: „Handbuch für Sternfreunde, Bd. 2“, Springer-Verlag
- [4] K. Schäfer, C. Synowitz (Hrsg.), 1970: „D’Ans-Lax, Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Bd. III“, Springer-Verlag
- [5] <http://nautilus.fis.uc.pt/st2.5/>
- [6] D. H. Wulff, 1971: „Doppelsterne“, Wilhelm Goldmann Verlag, München

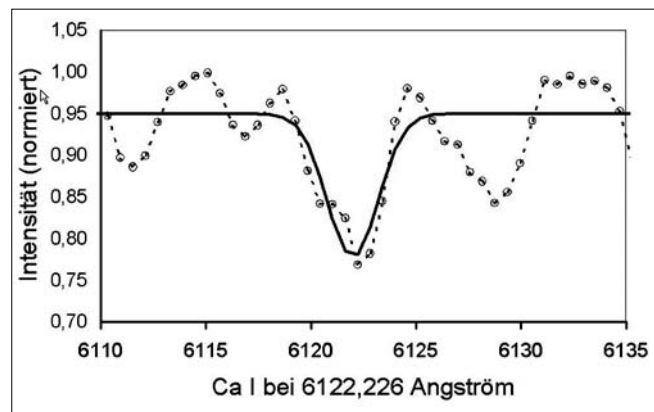
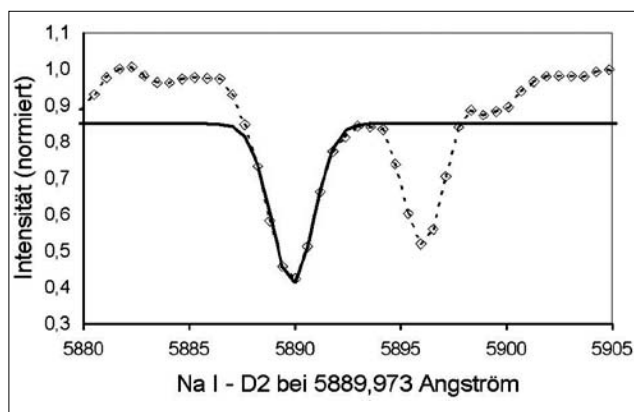


Abb. 5:
Gaußanpassung an stellaren Spektrallinien